

液化天然气装置净化与液化工艺关键技术研究

郭建廷

巴彦淖尔华油天然气有限责任公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015000

[摘要]液化天然气技术作为实现天然气资源跨区域调配以及高效利用的关键手段,其装置运行所呈现出的可靠性以及经济性状况,会直接影响到整个产业链的综合效益。伴随着中国液化天然气项目发展速度的不断加快,装置工艺的优化以及创新已然成为了行业关注的重中之重。液化天然气装置主要由净化单元、液化单元以及储存单元这三个部分构成,其中,净化单元对于确保装置能够实现长期且稳定的运行而言,有着极为重要的决定性作用。天然气当中所含有的酸性气体、水分、汞等各类杂质,在处于低温环境的状态下,极有可能引发设备出现腐蚀情况以及管道发生堵塞问题,所以务必要借助严格的预处理工艺,将这些杂质的含量降低至标准限值之下。

[关键词]液化天然气;深度净化;混合制冷剂;分子筛脱水;能效优化

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17510

中图分类号: TE624

文献标识码: A

Research on Key Technologies for Purification and Liquefaction Process of Liquefied Natural Gas Plant

GUO Jianting

Bayan Nur China Petrol Natural Gas Co., Ltd., Bayan Nur, Inner Mongolia, 015000, China

Abstract: Liquefied natural gas technology, as a key means of achieving cross regional allocation and efficient utilization of natural gas resources, the reliability and economic performance of its equipment operation will directly affect the comprehensive benefits of the entire industry chain. With the continuous acceleration of the development speed of liquefied natural gas projects in China, the optimization and innovation of equipment processes have become a top priority in the industry. The liquefied natural gas plant mainly consists of three parts: purification unit, liquefaction unit, and storage unit. Among them, the purification unit plays an extremely important and decisive role in ensuring the long-term and stable operation of the plant. Various impurities such as acidic gases, moisture, mercury, etc. contained in natural gas are highly likely to cause equipment corrosion and pipeline blockage in low-temperature environments. Therefore, it is necessary to use strict pretreatment processes to reduce the content of these impurities below the standard limit.

Keywords: liquefied natural gas; deep purification; mixed refrigerant; molecular sieve dehydration; energy efficiency optimization

通过 LNG 技术能够将天然气以液态的方式加以存储,以方便将天然气进行运输。一般将气态的天然气通过深冷处理技术到 -162°C ,在常压下就可以使得气态天然气变为液态, 625m^3 的气态天然气经过液化处理之后,可以变为 1m^3 体积的液态天然气,效果十分明显,这样可以大大降低天然气的体积,对于天然气后期在管道中的存储及运输都非常有利,经过多次对天然气的循环处理,就可以使液化天然气的各项指标符合要求。

1 液化天然气装置工艺概述

液化天然气装置因处理规模以及应用场景方面存在不同,所以在工艺流程的选择上有着明显差异。大型装置一般会采用并联多系列的设计方式来提升单线的效率,而中小型装置往往更倾向于模块化设计,以此来缩减建设周期。其核心工艺涵盖了原料气预处理、深度净化、低温液化还有产品储存这四个部分。现代装置设计着重于流程的简化以及设备的整合工作,原本传统的级联式液化流程正逐步被单一制冷系统所取代。这样的演进过程,一方面使

得设备的数量有所减少,另一方面也降低了相应的投资成本,并且还让控制系统的复杂程度降低了 50%以上。国内有一个大型项目引进了单循环混合制冷剂液化工艺,由此实现了每天能够处理 50万 m^3 天然气的的能力,这也很好地展示了先进工艺所具备的技术优势。模块化设计理念在装置建设方面得到了较为广泛的运用。具体而言,把整个装置划分成多个具备不同功能的模块,并且在工厂内部完成预制以及测试等相关工作之后再进行现场组装。这样的设计方式能够大幅度地缩短施工所花费的周期,同时也能让装置的质量具有更好的可控性,尤其适合在偏远地区以及海上平台这样的环境下开展相关建设工作。

2 天然气净化关键技术研究

2.1 脱酸工艺技术

酸性气体主要涵盖二氧化碳以及硫化氢这两种成分,这些成分在液化操作进程中会发生结晶析出的情况,进而引发设备出现腐蚀状况以及通道产生堵塞等问题,所以务必要借助脱酸工艺把它们的浓度降低到极为低下的程度。

在国内外,普遍被采用的脱酸技术包含化学吸收法、物理吸附法还有膜分离法等多种不同的方案,在这些方案当中,醇胺法化学吸收技术由于其具备良好的处理效果且工艺成熟度颇高,因此在液化天然气装置里得到了广泛的运用。甲基二乙醇胺溶液作为一款新型的脱酸溶剂,展现出了极为出色的选择性吸收特性以及较低的再生能耗优势,当下正逐步地取代传统的乙醇胺以及二乙醇胺溶液。固体吸附脱酸技术属于一种新兴的工艺方案,在中小型液化装置方面呈现出独特的优点^[1]。此项技术运用特种分子筛或者金属有机框架材料当作吸附剂,凭借变压吸附原理有选择性地捕获酸性气体分子。国内一家企业所开发的模块化净化系统采用了固体吸附脱酸单元,并且与真空解吸再生方式相结合,可将二氧化碳脱除到百万分之五十以下的程度,并且不用化学溶剂,使得工艺流程得以大幅简化。该系统采取先泄压而后真空解吸的再生办法,先是把脱酸吸附塔内部的压力泄放到常压状态,接着借助真空泵抽走吸附的二氧化碳,解吸出来的气体能够输送到燃料气系统去实现回收利用。

2.2 脱水工艺技术

水分存在时,液化装置低温区易结冰堵塞,引发设备故障甚至停产,脱水工艺关乎其稳定运行。分子筛吸附脱水技术脱水效果好、运行稳定,在液化天然气装置中很主流。常用分子筛材料如XA型、XB型沸石,有规整晶体结构和均一孔径分布,能选择性吸附水分子,让天然气组分通过。三塔循环操作模式属于现代分子筛脱水系统所具备的先进特点,其凭借对吸附再生和冷吹状态之间切换的巧妙安排,达成了连续脱水以及分子筛再生的协调运转状态。某项专利技术阐述了一种颇具创新性的脱水脱汞办法,该办法把原料气分成两个部分来分别加以处理:其中一部分进入到分子筛干燥塔内开展脱水脱汞作业,另一部分则充当再生气,用来促使分子筛完成再生过程。这样的设计一方面免去了对外部再生气源的需求,另一方面也提升了脱水系统的整体工作效率,尤其契合偏远地区以及海上平台的应用实际环境。再生气的加热以及控制情况,会对分子筛再生效果起到决定性的作用^[2]。一般而言,再生气电加热器得把气体加热到250~300℃这般高温程度,之后再让其进入到待再生的分子筛床层当中,以此来解析吸附着的水分。等再生这一流程完成之后,是需要开展冷吹操作的,通过此举使得分子筛床层的温度能够降低到正常的操作条件所对应的水平,防止高温气体进入到后续的工艺单元里面。在国内的某个项目当中,采用了再生气流量调节阀来控制再生气和原料气二者之间的压差,进而对再生气体量与能耗之间的平衡关系加以优化,最终达成脱水系统高效运行的目标。

2.3 脱汞及杂质脱除技术

汞及其化合物在天然气里的含量虽说极少,可是对于铝制设备而言,其腐蚀作用却十分突出,会致使液化装置的关键设备出现应力腐蚀开裂的情况,进而引发严重的安全事故。脱汞工艺一般是在脱水工序完成之后才去安排的,如此一来便能够防止水分对脱汞剂的吸附性能产生影响。

载硫活性炭算得上是最常被使用的脱汞吸附剂,它表面所负载的硫元素会和汞进行化学反应,最终生成较为稳定的硫化汞化合物,通过这样的方式便能够实现对汞的高效去除。对汞含量加以监测,这对于确保装置可以安全地运行而言,有着颇为重要的意义。在现代的液化天然气装置当中,一般都会配备有在线汞分析仪,借助它来实时对经过净化之后的天然气里面的汞浓度展开监测。冷原子吸收测汞仪具备检测极为低浓度汞含量的能力,其测量所能够达到的精度甚至能够达到纳克这样的级别,从而给装置的安全状况给予了一种可靠的保障。一旦检测出汞含量出现了超出标准的情况,系统便会自动把原料气切换到备用的脱汞塔那边去,或者是将其送回分子筛干燥塔重新来一番处理,以此来保证最终的产品气质量是完全符合相关标准方面的要求的。重烃组分同样属于需重点留意的杂质范畴,它于低温状况下会出现凝固并析出的情况,进而致使换热设备产生堵塞问题,同时传热效率也会出现下滑状况^[3]。重烃分离一般会采用将低温冷凝和分离相互结合起来的方式,借助降温手段让重烃组分得以冷凝液化,随后在分离器当中达成气液分离的效果。国内某一液化装置运用重烃洗涤塔来脱除重烃组分,以此确保液化单元进料气的质量能够满足相应的要求。经过净化处理后的天然气得经过粉尘过滤器以及碳粉过滤器实施最终的过滤操作,把可能携带的固体颗粒还有吸附剂粉末去除掉,接着再进入到液化单元去接受相应的处理。

3 天然气液化关键技术研究

3.1 液化流程分类与特点

天然气液化流程依照其制冷方式可划分成三种类型,分别是级联式液化流程、混合制冷剂液化流程以及膨胀机制冷流程。就级联式液化流程而言,它是运用多种纯组分制冷剂来展开阶梯式的制冷操作,虽说此种流程的制冷效率颇高,然而其系统的复杂程度也相应地较高。混合制冷剂液化流程则是把多种不同的制冷剂组分混合到一起形成单一的制冷剂,如此一来,系统的构造得以简化,不过要想实现配比的优化便显得较为复杂了。而膨胀机制冷流程是凭借高压气体在膨胀过程中所产生的冷量来达成制冷目的,其流程相对来说是比较简单的,只是液化率方面会处于一个比较低的水平。国内有一调峰装置引入了单循环混合制冷剂液化工艺,其每天可处理50万m³的天然气。此工艺运用由氮气、甲烷、乙烯以及异戊烷组合而成的混合制冷剂,借助两级压缩以及冷却的方式来达成制冷循环,使得设备数量缩减30%以上,仪表数量减少的程度更是超过了50%,如此一来,维护成本得以大幅降低,操作的复杂程度也有了明显下降。

3.2 混合制冷剂液化工艺

混合制冷剂液化工艺在现代装置里属于主流的技术趋向,其关键核心之处就在于对制冷剂组分子以优化配比以及对循环参数展开高效设计。混合制冷剂是由氮气、甲烷、乙烷、丙烷等多种组分按照特定比例相互混合而形成的,在液化这个过程当中,各个组分会发挥出不一样的制

冷效果,进而达成从环境温度一直到-162℃这样的温区范围的全覆盖。相关研究明确指出,最为理想的制冷剂配比应当是甲烷占比 22.1%、氮气占比 11.5%、乙烯占比 35.9%、丙烷占比 15.8%以及异戊烷占比 14.7%,在这样的配比情况之下,液化单元所对应的比功耗能够降至最低程度。通过响应面分析可以发现,氮气、甲烷还有乙烯这几种成分之间存在的交互作用其显著性是比较强的,并且这些组分所占的比例对于整个系统的性能而言会产生决定性的重大影响。丙烷预冷混合制冷剂工艺把级联式与混合制冷剂工艺的的优点都结合了起来,其先是凭借丙烷制冷循环来完成预冷环节,随后再依靠混合制冷剂达成深冷液化的效果。如此一来,该方案能够大幅度地将混合制冷剂压缩功耗降下来,进而提升整个系统的运作效率。在 2025 年的时候,杭州中泰深冷技术股份有限公司所开发出的三重制冷方案,其综合单位液化能耗要比丙烷预冷混合制冷剂工艺以及常规级联式工艺都要低一些。

3.3 膨胀机制冷液化工艺

膨胀机制冷液化工艺依靠高压气体膨胀时产生的温降效应来达成天然气液化的目的,它具备流程简练、设备布局紧凑以及启动速度较快等诸多优势,尤其契合中小型液化装置以及调峰型应用场合的实际需求。该工艺往往无需借助外部制冷剂,而是凭借原料气自身所具有的压力能来生成冷量,如此一来便能让系统的构成得以简化,操作与维护起来也更为便捷。不过膨胀机制冷工艺的液化率相对来说是比较低的,大致处于百分之十五到百分之二十五这样的区间范围之内,其具体数值会依据原料气的压力状况以及组成条件而有所不同。国内有一套每天能够处理两千立方米的微型天然气液化装置,其运用膨胀机制冷这一工艺,顺利达成了分布式液化方面的功能。此装置凭借着管网所具备的压力能,借助气体膨胀机来达成温降的效果,进而把部分天然气实现液化并予以储存,而剩余的气体则可返回到管网当中,或者当作燃料气来加以使用。这样的一种小型液化装置,给解决偏远地区天然气利用方面存在的问题给出了相应的技术方案,促使液化天然气生产呈现出分散化以及本地化的态势。膨胀机制冷工艺在优化方面,重点聚焦于提升液化率以及削减能耗这两个层面。运用多级膨胀、回流冷凝这类技术手段,能够切实有效地提升系统的液化率。国内有一研究团队所研发出来的带有预冷功能的膨胀机制冷工艺,其做法是先把原料气预冷到零下四十摄氏度,之后再开展膨胀操作,如此一来,液化率得以提升至百分之三十以上,工艺的经济性也得到了颇为显著的改进。还有一种优化的方案,那就是借助外部冷源,像是液氮或者混合制冷剂,来对原料气实施预冷处理,以此方式来削减膨胀过程中出现的不可逆损失,进而促使系统焓效率得以提高。

3.4 液化过程能效优化

液化过程的能耗大多集中在压缩机、制冷剂冷却以及换热设备这些环节上,在这些环节当中,压缩机组所耗费

的能量所占的比例超过了百分之七十。运用多级压缩加上级间冷却的技术,能够较为明显地降低压缩功耗,让压缩的过程尽量接近等温压缩的状态。相关研究显示,三级压缩和二级压缩相比,可以让压缩机的焓损失减少百分之十八点九。换热设备属于能耗优化方面的又一个关键环节,其中主低温换热器在设计以及运行层面,对于系统的能效会产生颇为重^[4]。焓分析方法属于一种行之有效的热力学评估工具,其在液化过程的能效优化方面起着颇为关键的作用。借助对该系统各个不同环节的焓损失分布加以计算的方式,便能够精准地识别出能效方面的瓶颈所在之处以及后续的改进方向。相关研究清晰地表明,液化装置的焓损失大多集中在像压缩机、换热器还有节流阀等诸多部位,而在这些部位当中,压缩机所占的焓损失比例更是高达 73.9%。

4 结束语

液化天然气装置所涉及的净化以及液化工艺技术属于多学科交叉且极为复杂的范畴,其中涵盖了热力学、材料学、控制工程等诸多专业的知识,并且需要将这些知识综合起来加以运用。本文针对脱酸、脱水、脱汞等一系列净化工艺,对其各自的技术特点展开分析,同时就混合制冷剂液化、膨胀机制冷等液化工艺的优化路径展开深入探讨,以此为中国液化天然气装置的技术升级工作给予一定的参考借鉴。甲基二乙醇胺脱酸技术在能耗方面有着明显的优势,而分子筛脱水脱汞的一体化设计能够提升净化的效率,混合制冷剂配比的优化会对液化系统的能效起到决定性的作用。现代的装置正朝着模块化设计以及智能化控制的方向去发展,借助流程的简化以及设备的集成来降低投资以及运营方面的成本。未来液化天然气装置技术的发展会更侧重于环境适应性以及运行灵活性方面,其能适应不一样的气质条件以及负荷变化的要求。将可再生能源同液化过程相结合乃是十分重要的一个发展方向,通过借助可再生能源来给予部分压缩动力或者制冷需求,以此使得液化过程的碳足迹得以降低。

【参考文献】

- [1]董颖,赵春立,王国付,等.液化天然气冷能和核工业余热利用的联合动力循环[J].高校化学工程学报,2025,39(4):692-699.
- [2]戴志向,尹涛,韩传军,等.液化天然气槽车低温快速连接装置设计及密封性能分析[J].润滑与密封,2025,50(8):172-178.
- [3]汪文诚,黄高新.港口液化天然气罐箱堆场设计研究[J].中国港湾建设,2025,45(8):91-96.
- [4]王阳.LNG 液化工厂冷剂系统余能利用改造方案[J].山西化工,2022,42(9):76-77.

作者简介:郭建廷(1988.12—),男,毕业院校:中国石油大学(华东),学历:本科,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:巴彦淖尔华油天然气有限责任公司,职务:技术员,职称级别:中级工程师。